宁夏红寺堡扬黄灌区土壤盐渍化特征

牛子路[1,2,3]， 王 磊[1,2,3]， 齐拓野[1,2,3]， 张伊婧[1,2,3]， 申建香[1,2,3]，
杨竹青[1,2,3]， 王恩田[1,2,3]， 蒋淑汀[1,2,3]

（1. 宁夏大学生态环境学院，宁夏 银川 750021；2. 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021；3. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021）

摘 要：为探究影响红寺堡扬黄灌区土壤盐渍化的主要影响因素，采用相关性分析法和主成分分析法对0~100 cm土壤剖面盐渍化特征进行研究，结果表明：（1）研究区土壤整体为强碱性土，下层20~100 cm土壤pH值显著高于上层0~20 cm土壤pH值（$P<0.05$），并随着土壤深度的增加而增加，土壤全盐含量同样随土壤深度的增加而增加，呈底层高表层低的底聚型剖面特征，各层土壤全盐含量差异性不显著（$P<0.05$），各层土壤pH值均属于弱变异性，在空间上分布较为均匀，土壤全盐在上层0~20 cm深度属于中等变异性，在下层20~100 cm深度属于强变异性，空间分布上随着深度的变化出现差异。（2）研究区内主要阳离子为Na^++K^+，各阳离子间含量差异性显著（$P<0.05$），阴离子主要为SO_4^{2-}，相较于其他阴离子含量差异性显著（$P<0.05$），各离子含量SO_4^{2-} >Na^++K^+> Ca^{2+} >Mg^{2+}> HCO_3^- >Cl^-> CO_3^{2-}，各离子浓度也随着土壤深度的增加而增加，与全盐和pH值变化一致。（3）通过相关性分析和主成分分析发现灌区内影响全盐的主要因子为SO_4^{2-}、Cl^-、Na^++K^+、Mg^{2+}，影响pH的主要因子则为CO_3^{2-}、HCO_3^-，主要盐类以硫酸盐和氯化盐为主，但不同剖面深度盐类有显著差异，上层盐类主要是氯化盐类，下层则是硫酸盐类和氯化盐复合型，研究结果探明了影响红寺堡扬黄灌区土壤盐分特征的主导因子，为研究区盐碱地治理提供理论依据。

关键词：盐碱地；盐渍化特征；相关性分析；主成分分析；红寺堡扬黄灌区；宁夏

土壤盐碱化是由于自然或人类不合理灌溉造成盐分在土壤中逐渐积累而形成的一种土壤退化现象，广泛发生在内陆干旱地区，目前已成为全球性环境问题之一[1-2]。土壤中存在的过量可溶性盐离子会通过渗透胁迫和离子毒性影响植物的生长发育，从而破坏当地农业生产[3-4]。开展区域盐渍化特征研究可为土地合理开发利用提供决策参考，对防止和治理土壤盐渍化、提高土地利用率、维护区域生态安全、实现可持续发展具有积极的意义[5-6]。

当前国内外学者应用相关性分析和主成分分析法对土壤盐分特征进行了大量研究，对土壤中各类盐分离子、不同理化性质间相关性的研究也有大量报道。分析土壤pH、盐分与离子间的相关性，是进一步认识土壤盐分组成规律的基础，可以有效的指导土壤盐渍化的预防和改良应用[7]，相关性分析可以揭示盐分在土体中的分布和存在状态，在一定程度上反映盐离子的同源性、推断土壤盐分的来源并可以在一定程度上反映出土壤盐分的运移趋势[8]，应用主成分分析法可以对变量进行降维，从而客观地描述样品的相对地位，在土壤盐分特征分析方面已经有了大量应用[9]。刘迁迁等[10]对察南灌区土壤不同含盐量土壤进行盐化程度分级，分析其影响因素，发现灌区以碱性土壤为主，HCO_3^-是影响土壤pH的主要因子，总盐分与各离子之间均呈正相关关系，主成分分析显示HCO_3^-、Cl^-、K^+为影响该灌区土壤盐分特征的主导因子；Zhao等[11]通过主成分分析法对中新天津生态城内土壤进行分析，发现Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}是决定土壤可溶性盐含量主要控制因素，相应提出土壤修复和绿化措施；郭双双等[12]对艾比湖流域不同植被类型覆盖条件下风沙土土壤总盐含

收稿日期：2023-04-07； **修订日期**：2023-06-21
基金项目：国家重点研发计划项目（2921YFD1900600）；宁夏回族自治区重点研发计划项目（2022BEG03053）
作者简介：牛子路（1999-），男，硕士研究生，主要从事土壤盐碱化研究. E-mail: niuzilu1223@163.com
通讯作者：齐拓野. E-mail: qtyjob@163.com

量、可溶性离子等指标进行相关性分析以及主成分分析，确定其土壤盐分类型以氯化物-硫酸盐型和硫酸盐型为主，从而判断该区域内风沙土的盐渍化类型为盐土。

红寺堡扬黄灌区形成土壤盐渍化的主要原因是排水不畅。由于潜水埋深变浅，盐分随着水在土壤中富集，在灌溉作用下，盐分运移，使非盐化土壤也产生了次生盐渍化[13]。部分学者对红寺堡盐碱地现状进行了研究，余秋生等[14]对红寺堡扬黄灌区是否潜伏有土壤次生盐渍化灾害，土壤次生盐渍化灾害的潜伏期长和治理难度进行了综合分析。方媛等[15]应用WET土壤水分温度电导率速测仪对土壤盐渍化进行了评价，发现灌区潜水埋深自北向南逐渐增大，总溶解固体（Total Dissolved Solids，TDS）浓度自北向南逐渐减小，全盐量的变化也是由北向南逐渐减小，地下水位埋深越浅，地下水TDS值越高的区域土壤盐渍化越严重。各地盐碱土壤类型不同，其改良方式也不同，因此探明土壤盐碱化特征就显得尤为重要[16]，为探明红寺堡扬黄灌区土壤面临的潜在盐碱化危害，应用相关分析、主成分分析对灌区内土壤全盐、pH以及土壤可溶性离子进行量化分析，旨在明确灌区内土壤盐碱化及其主要控制离子，综合分析区域土壤盐碱化特征的总体情况，探析影响土壤盐分特征的主导因子，为研究区盐碱地治理提供科学依据。

1 研究区概况

红寺堡扬黄灌区地处宁夏中部干旱带，土地面积约27.6×10^4 hm^2，包括红寺堡镇、太阳山镇、柳泉乡、新庄集乡和大河乡及利通区部分地区，地理坐标为105°43′45″~106°42′50″E，37°28′08″~37°37′23″N，灌区地势南高北低，西靠烟筒山，东南接罗山，北临牛首山，平均海拔1240~1450 m，属于典型的温带大陆性气候，常年干旱少雨，昼夜温差大，日照时间长，多年平均降水量251 mm，降雨多集中在7—9月，多年平均蒸发量2387 mm，为降水量的9倍多。多年平均气温8.7 ℃，气温日较差13.7 ℃，全年日照时数2900~3550 h，全年大于10 ℃积温可达3200 ℃以上。土地面积约为8.8×10^4 hm^2，主要种植作物以玉米和小麦为主。红寺堡扬黄灌区内无可以利用与灌溉的地表和地下水资源，农业灌溉依靠引灌黄河水漫灌为主，导致灌区内耕地次生盐碱化风险不断加剧。

红寺堡扬黄灌区内土壤母质多为红土母质，主要分布在灌区内侵蚀较严重的丘陵地带，呈红棕色，多为黏土，部分为次生红土，土壤含盐量较高。因此，灌区提水灌溉后，由于土壤母质含盐量较高，有效土层薄，灌溉水深层入渗将土层内盐分大量溶解，盐分随水分蒸发进入耕作层，产生土壤盐碱化；灌区未配置完善的排灌设施，加之地下水位高且具有一定的盐分，地下存在不透水层，导致次生盐渍化逐年加重，目前灌区内土壤盐渍化面积占灌区面积的10%以上。

2 数据与方法

2.1 土壤样品取样

依据红寺堡扬黄灌区的分布现状，选取灌区内农用地均匀布设取样点，当取样点为建设用地或河流湖泊等水域时，将取样点适当调整至周围农田，每个取样点间隔3 km，共布设取样点77个（图1），每个取样点用土钻分0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm共6层采样，每个样点按对角线取样法每隔10 m等距取样3次同层混样，分析统计时对不同分层离子含量进行平均处理，取样时间集中在2022年春灌前的3月23日至3月31日。

2.2 测定项目及方法

采集的土壤样品自然风干，研磨过筛备用。所有的土样均制备1∶5土水比浸提液，用梅特勒便携式多参数测试仪（SG78）测定土壤pH和电导率值，并计算土壤全盐含量，可溶性离子的测定方法参照《土壤农化分析》[17]，CO_3^{2-}、HCO_3^-用标准H_2SO_4双中和滴定法测定，Ca^{2+}、Mg^{2+}用EDTA络合滴定法测定，SO_4^{2-}用EDTA络合滴定法测定，Cl^-用标准$AgNO_3$滴定法测定，K^+、Na^+用火焰光度计法测定。

2.3 数据处理与分析

采用Excel对土壤全盐含量、pH值和可溶性离子浓度进行统计分析，采用SPSS 25.0进行方差分析、相关性分析和主成分分析，使用Origin 2022绘制指标剖面图，ArcGIS软件绘制研究区域地理位置、采样点位置和反距离权重插值。

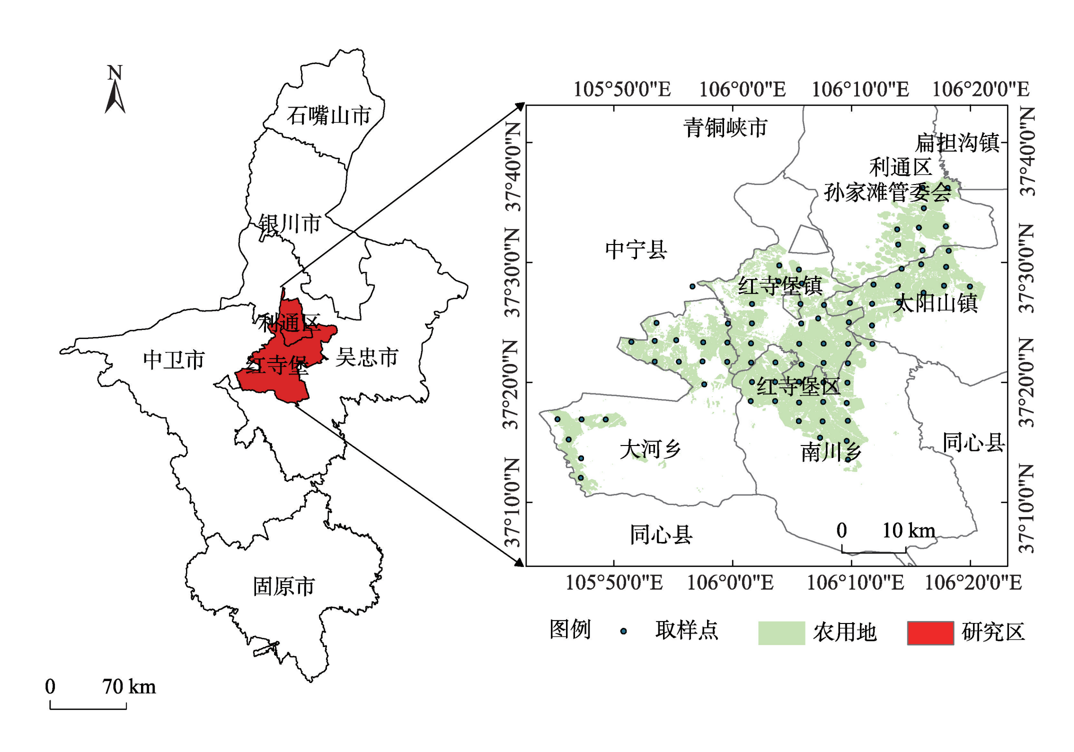


图1　研究区概况图

Fig. 1　Study area and soil sampling sites

3　结果与分析

3.1　土壤各指标含量剖面分析

土壤全盐含量(Total Salt Content, TS)和pH分别是表征土壤盐化和碱化程度的重要指标[18-19]，对红寺堡扬黄灌区内77个采样点6层土壤的的盐碱化指标进行统计分析(表1)，灌区内pH整体范围在8.95~9.08，土壤整体属于强碱性土壤，并且随着土壤深度的增加，土壤pH值随之增加，下层20~100 cm深度土壤pH值显著高于上层0~20 cm深度土层(P<0.05)。不同深度土壤全盐范围整体在593.29~825.67 mg·kg^{-1}，各层之间整体差异性不显著(P<0.05)，按照我国土壤盐渍化分级标准，研究区土壤盐化程度整体较低，轻度盐渍化土以及部分中度盐渍化土在研究区内零星分布[20]，土壤全盐同样随着土壤深度的增加而增加，总体呈表层低和底层高的底聚型剖面(图2)。

由图3可知，从不同深度土层来看，SO_4^{2-}、Na^++K^+浓度均显著高于其他离子(P<0.05)，Ca^{2+}和Mg^{2+}浓度除在80~100 cm深度不显著外(P<0.05)，其他深度Ca^{2+}、Mg^{2+}浓度均显著高于其他离子(P<0.05)，HCO_3^-、Cl^-和CO_3^{2-}在各深度土层浓度差异均不明显(P<0.05)。从阳离子来看，土壤盐分中主要的阳离子为Na^++K^+，在不同深度土层中Na^++K^+均占阳离子总量的50%以上，浓度显著高于其他阳离子(P<0.05)，Ca^{2+}浓度在各土层均高于Mg^{2+}。阴离子组成中SO_4^{2-}浓度最高，其浓度显著高于其他阴离子(P<0.05)，其次为HCO_3^-、Cl^-，CO_3^{2-}在各层土壤浓度均为最低，并且部分土样并未检出CO_3^{2-}。红寺堡扬黄灌区内各离子含量SO_4^{2-}>Na^++K^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>HCO_3^->Cl^->CO_3^{2-}，主要盐分类型以氯化盐硫酸盐为主。

变异系数(C_v)能够反映数据的离散程度，当C_v≤10%呈现弱变异性，10%<C_v≤100%呈现中等变异性，C_v>100%呈现为强变异性[21]。从垂直剖面看，pH值变异系数在各层变化不大(图4)，范围在1.67%~3.19%，整体属于弱变异性，说明区内土壤的pH空间差异较小，离散程度较弱，分布较为均匀。土壤全盐的变异系数在70.19%~116.53%，说明灌区内盐分分布不均匀，在上层0~20 cm土层表现出中等变异性，下层20~100 cm土层则表现为强变异性，随着深度的增加，全盐在研究区的空间分布出现差异，表现出较强的空间异质性，并随着深度的增加呈增加的趋势。各离子在上层0~20 cm土层变异系数变

表1 土壤全盐、pH及盐离子含量统计

Tab. 1 Statistics of total salt content, pH, and salt ion content in soil

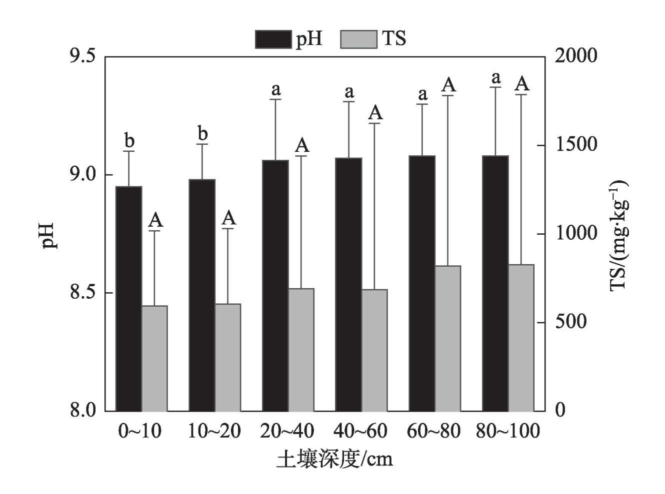
土层深度/cm	参数	pH	全盐(TS)/(mg·kg⁻¹)	CO_3^{2-}/(mg·kg⁻¹)	HCO_3^-/(mg·kg⁻¹)	Cl^-/(mg·kg⁻¹)	SO_4^{2-}/(mg·kg⁻¹)	Ca^{2+}/(mg·kg⁻¹)	Mg^{2+}/(mg·kg⁻¹)	Na^++K^+/(mg·kg⁻¹)
0~10 (n=77)	最小值	8.60	290.77	0.00	20.33	8.47	258.80	60.00	13.01	106.35
	最大值	9.40	3218.81	2.77	164.57	98.67	1027.05	338.67	113.87	956.19
	均值	8.95	593.29	1.34	30.92	17.44	510.22	135.28	47.83	253.74
	标准差	0.15	425.45	0.56	16.79	11.56	132.48	37.31	21.68	143.37
	变异系数/%	1.68	71.71	41.79	54.30	66.28	25.97	27.58	45.33	56.50
10~20 (n=77)	最小值	8.60	300.75	0.00	16.81	9.26	259.15	82.67	14.64	125.50
	最大值	9.27	2776.36	3.30	46.50	71.49	1333.70	258.67	246.44	679.62
	均值	8.98	604.90	1.41	27.28	17.83	510.82	132.82	50.55	242.16
	标准差	0.15	425.55	0.66	6.32	11.15	173.54	34.49	33.54	121.70
	变异系数/%	1.67	70.35	46.81	23.17	62.54	33.97	25.97	66.35	50.26
20~40 (n=76)	最小值	8.00	276.94	0.00	3.25	7.68	177.96	36.00	2.44	32.69
	最大值	9.92	4699.41	6.00	95.57	146.53	1575.64	448.00	161.04	1197.18
	均值	9.06	690.53	1.35	26.75	19.37	501.03	128.38	48.79	238.66
	标准差	0.26	748.66	1.12	11.81	21.30	228.87	66.07	34.36	177.31
	变异系数/%	2.87	108.42	82.96	44.15	109.96	45.68	51.46	70.42	74.29
40~60 (n=76)	最小值	8.41	276.71	0.00	4.47	5.91	176.89	56.00	2.44	33.06
	最大值	9.91	3593.68	6.40	92.32	137.67	2363.97	352.00	407.48	1187.93
	均值	9.07	685.03	1.31	25.09	19.04	495.98	124.16	49.17	252.33
	标准差	0.24	642.03	1.11	11.64	19.48	286.14	65.18	51.32	184.11
	变异系数/%	2.64	93.72	84.73	46.39	102.31	57.69	52.50	104.37	72.96
60~80 (n=75)	最小值	8.28	297.92	0.00	10.98	8.86	177.96	48.00	1.22	44.28
	最大值	9.62	4602.75	4.20	47.58	150.08	1966.03	420.00	329.40	1344.53
	均值	9.08	818.45	1.30	24.13	20.53	502.65	120.29	55.34	267.85
	标准差	0.22	939.88	0.95	6.73	23.35	277.69	59.42	50.91	220.45
	变异系数/%	2.42	114.84	73.08	27.89	113.74	55.25	49.40	91.99	82.30
80~100 (n=74)	最小值	8.16	323.39	0.00	4.07	7.68	205.55	28.00	2.44	40.41
	最大值	9.91	5024.77	6.50	67.92	145.35	6518.8	1720.00	561.20	1149.78
	均值	9.08	825.67	1.23	24.63	20.00	587.68	137.92	61.85	298.33
	标准差	0.29	962.13	1.27	8.66	19.06	742.10	193.85	74.31	221.90
	变异系数/%	3.19	116.53	103.25	35.16	95.30	126.28	140.55	120.15	74.38

化均不高，均属于中等变异性，在20 cm土层以下各离子变异系数呈上升的趋势，说明各离子在土壤下层分布差异性较大，在空间上的分布不均匀，其中Ca^{2+}, SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、Mg^{2+}变化幅度较大，可能是由于部分地区土壤深层的$CaCO_3$、$MgCO_3$溶解度较低，离子以沉淀的形式存在不透水层中，导致深层各离子的变异系数增大。

3.2 不同剖面深度土壤盐碱化指标相关性分析

由于不同离子与pH和全盐的关联性存在差异，为分析盐离子在土壤中的存在形态和积累特点，通过对各离子含量间进行相关性分析，可推断土壤盐分的来源，并在一定程度上反映出土壤盐分的运移趋势[22]。在SPSS 25.0中用Pearson相关分析法分别对土壤中全盐、pH以及各离子进行相关性分析。

相关性分析结果表明(图5)，0~10 cm土层全盐含量与Cl^-和Na^++K^+呈极显著的正相关($P<0.001$)，相关系数分别为0.92和0.62，pH值与Ca^{2+}呈极显著的负相关($P<0.01$)，相关系数为−0.32，各离子之间SO_4^{2-}与Ca^{2+}和Mg^{2+}的相关系数分别为0.61和0.66，Cl^-与Na^++K^+相关系数为0.61，均呈极显著的正相关($P<0.001$)。10~20 cm土层全盐与Cl^-、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、

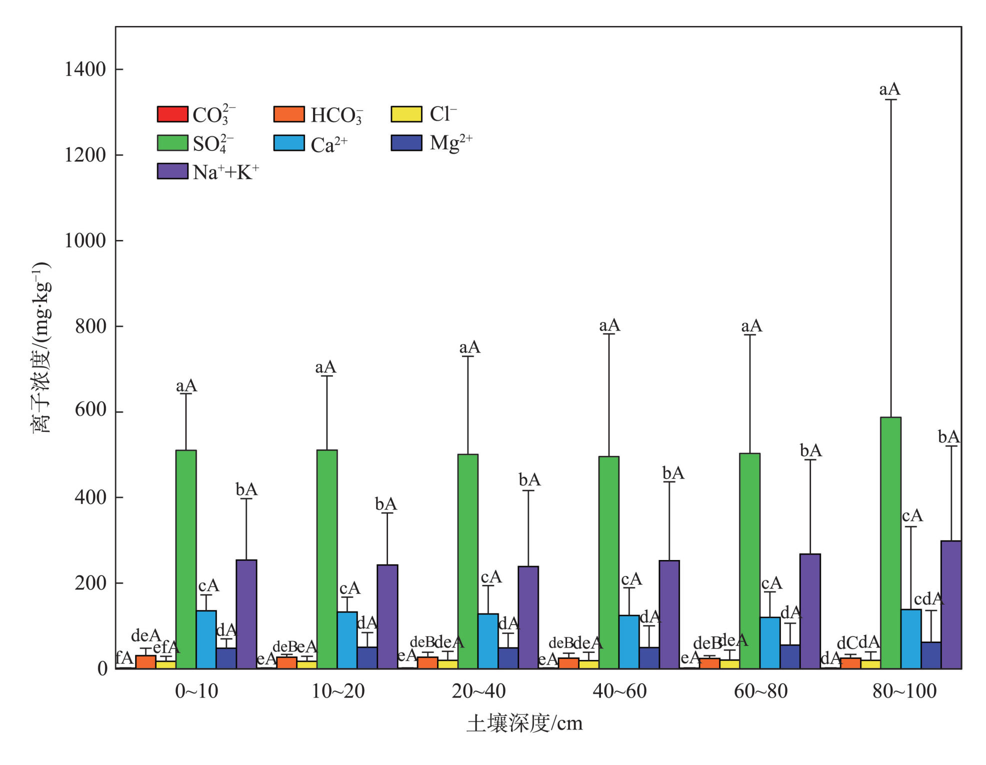


注：小写字母表示不同深度土壤pH差异显著($P<0.05$)，大写字母表示不同深度土壤全盐差异显著($P<0.05$)。

图2　土壤全盐含量、pH在剖面中的分布特征

Fig. 2　Distribution characteristics of total salt content and pH in the profile

$Na^{+}+K^{+}$和Ca^{2+}呈极显著的正相关($P<0.001$)，相关系数分别为0.88、0.51、0.52、0.42和0.83，pH值与CO_3^{2-}呈极显著的正相关、与Ca^{2+}呈极显著的负相关($P<0.001$)，相关系数分别为0.49和−0.54，除CO_3^{2-}和HCO_3^-外，其他各离子间均呈极显著的正相关关系($P<0.001$)，离子间的关系密切。20~40 cm土层，全盐同样与Cl^-、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、$Na^{+}+K^{+}$呈极显著的正相关($P<0.001$)，相关系数变化不大，pH除与CO_3^{2-}呈极显著的正相关外($P<0.001$)，与HCO_3^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}均呈极显著的负相关($P<0.001$)。在40~60 cm土层，全盐与CO_3^{2-}、Cl^-、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、$Na^{+}+K^{+}$呈极显著的正相关($P<0.001$)，与CO_3^{2-}相关系数为0.32，pH则是与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}呈极显著的负相关($P<0.001$)，相关系数分别为−0.51、−0.47、−0.44，CO_3^-在此土层与Cl^-、SO_4^{2-}、$Na^{+}+K^{+}$呈显著的正相关($P<0.05$)，与Mg^{2+}呈极显著的正相关($P<0.001$)，相关系数达到0.59。60~80 cm土层，全盐与HCO_3^-呈显著的负相关($P<0.05$)，相关系数为−0.24，与Cl^-、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、$Na^{+}+K^{+}$和Ca^{2+}同样呈极显著的正相关($P<0.001$)，pH同样与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}呈极显著的负相关($P<0.001$)，Cl^-与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}的相关性减弱，仅与$Na^{+}+K^{+}$呈显著的正相关($P<0.001$)。80~100 cm土层，pH与CO_3^{2-}呈极显著的正相关($P<0.05$)，与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}呈极显著的负相关($P<0.001$)，全盐与Cl^-、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、$Na^{+}+K^{+}$和Ca^{2+}同样呈极显著的正相关($P<0.001$)，在此土层中Cl^-仅与$Na^{+}+K^{+}$呈极显著的正相关($P<0.001$)，与其他离子相关性减弱，SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}三种离子间则成极显著的正相关($P<$



注：小写字母表示同一深度不同离子浓度间差异显著($P<0.05$)，大写字母表示不同深度同一离子浓度差异显著($P<0.05$)。

图3　土壤中主要离子的浓度及其垂直分布态势

Fig. 3　Concentration and vertical distribution of major ions in soil

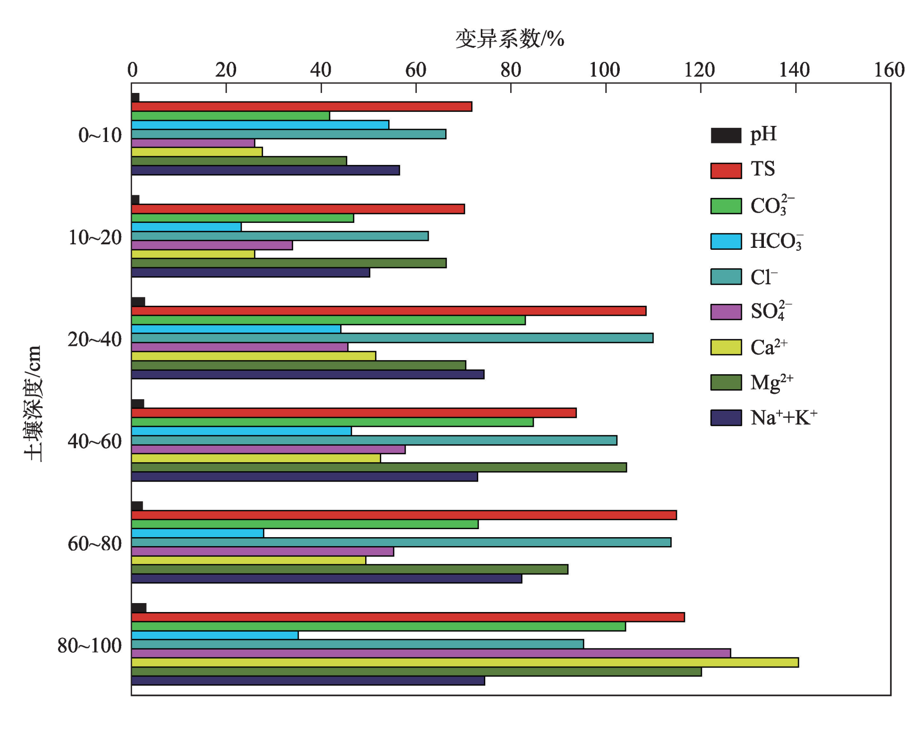


图4 不同深度土层各指标变异系数

Fig. 4 Variation coefficient of various indicators of soil layers at different depths

0.001),相关系数达到0.97、0.91和0.81。

从整个剖面来看,随着土层的变化,各指标间的相关性随之变化。Cl^-、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、Na^++K^+和Ca^{2+}是影响土壤全盐的主要离子,pH则主要由CO_3^{2-}、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}影响,SO_4^{2-}、Ca^{2+}的存在会使土壤pH值下降,随着土层深度的变化,SO_4^{2-}与全盐以及Ca^{2+}、Mg^{2+}的相关性不断增强,Cl^-与全盐的相关性则逐渐减弱,但在不同深度中相关性均是最高,Cl^-与Na^++K^+的相关性变化幅度也不大,说明灌区内土壤上层全盐主要是由Cl^-与Na^++K^+组成的氯化盐类,而下层深度全盐则是由硫酸盐类和氯化盐类共同影响。

3.3 土壤指标主成分分析

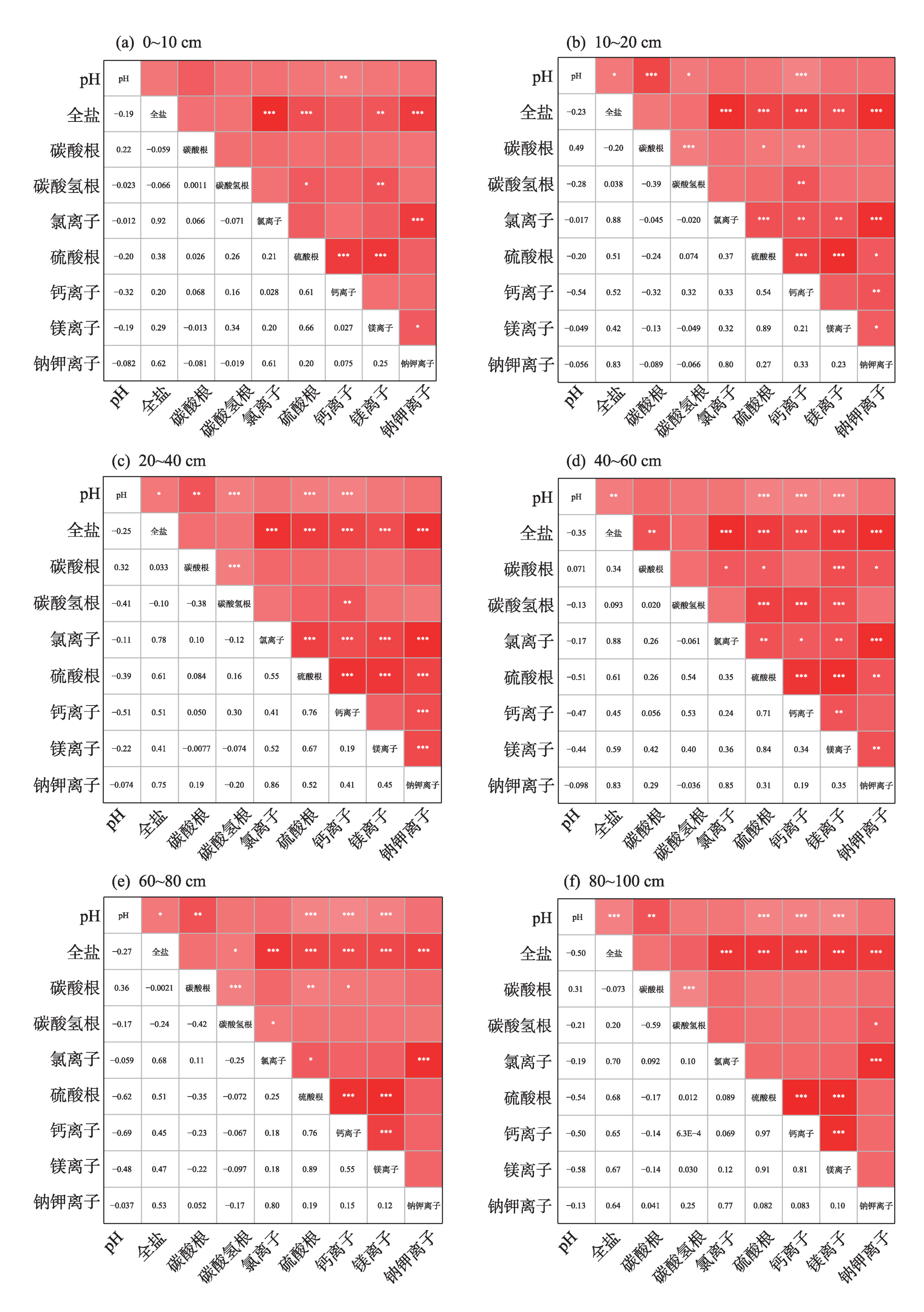
采用主成分分析法,对各土层全盐、pH以及盐基离子平均化后进行主成分分析探究该地区盐渍化的主导因子,以对土壤盐渍化做出正确的评价。

原始变量间存在相关性是进行主成分分析的首要条件,否则原始变量无法进行降维处理。为了检验变量之间是否存在相关性,采用球形检验(KMOKMO and Bartlett's Test)来检验分析指标是否适合做因子分析。检验结果为0.721,显著性均小于0.001,表明数据可以做主成分分析[23]。

根据各土层全盐、pH以及盐基离子平均化后数据提取出两个主成分进行分析,如表2可知,主成分一和主成分二的特征值分别为4.462、1.830,累积贡献率分别为49.58%、69.94%,两个主成分累积方差贡献率为69.94%,保持了原变量的绝大部分信息,信息损失量为30.06%,9个指标反映的信息大致可由两个主成分表征,其中主成分一较为重要,包含的信息也较多,各指标系数的大小反映该指标对各主成分的贡献程度,其中pH和CO_3^{2-}负向载荷,其他均为正向,TS、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、Na^++K^+、Cl^-的因子载荷较大,分别为0.916、0.887、0.858、0.832和0.789,是影响土壤全盐的主要影响因素,且这四个离子与全盐呈极显著的正相关性,离子之间也有极强的相关性,说明第一主成分主要代表了土壤的盐渍化状况。主成分二中pH与CO_3^{2-}的载荷量较高,综合反映了土壤pH的高低程度,根据各指标与主成分之间的相关性关系,可以将SO_4^{2-}、Na^++K^+、Mg^{2+}、Cl^-、CO_3^{2-}、HCO_3^-作为影响研究区内土壤盐碱状况的主要特征因子。

以Z_1、Z_2代表两个主成分,Y代表综合得分,将因子载荷量与标准化后的数据相乘,得出红寺堡扬黄灌区内土壤盐渍化成分得分矩阵(表3)及表达式:

$$Z_1 = -0.170(\mathrm{pH}) + 0.434(\mathrm{TS}) - 0.02(CO_3^{2-}) + 0.074(HCO_3^-) + 0.374(Cl^-) + 0.420(SO_4^{2-}) + 0.376(Ca^{2+}) + 0.406(Mg^{2+}) + 0.393(Na^+ + K^+)$$



注：*表示相关性在0.05水平下显著；**表示相关性在0.01水平下显著；***表示相关性在0.001水平下显著。

图5 土壤盐分因子相关系数矩阵

Fig. 5 Correlation matrix between soil salt ions

表2 土壤主成分因子载荷矩阵、特征值及累计贡献率

Tab. 2 Load matrix, characteristic value and cumulative contribution rate of soil principal component factors

因子	主成分一	主成分二
pH	−0.358	0.714
全盐(TS)	0.916	0.293
CO_3^{2-}	−0.042	0.624
HCO_3^-	0.156	−0.453
Cl^-	0.789	0.501
SO_4^{2-}	0.887	−0.278
Ca^{2+}	0.795	−0.376
Mg^{2+}	0.858	−0.115
Na^++K^+	0.832	0.399
特征值	4.462	1.830
累计贡献率/%	49.58	69.94

表3 主成分得分系数矩阵

Tab. 3 The score coefficient matrix of principal components

因子	主成分一	主成分二
pH	−0.170	0.527
全盐(TS)	0.434	0.216
CO_3^{2-}	0.020	0.461
HCO_3^-	0.074	−0.335
Cl^-	0.374	0.370
SO_4^{2-}	0.420	−0.205
Ca^{2+}	0.376	−0.278
Mg^{2+}	0.406	−0.085
Na^++K^+	0.393	0.295

(1)

$$Z_2=0.527(\mathrm{pH})+0.216(\mathrm{TS})+0.461(CO_3^{2-})-0.335(HCO_3^-)+0.370(Cl^-)-0.205(SO_4^{2-})-0.278(Ca^{2+})-0.085(Mg^{2+})+0.295(Na^++K^+) \quad (2)$$

$$Y=0.496Z_1+0.203Z_2 \quad (3)$$

Z_1、Z_2表达式中各指标系数分别为主成分因子及各盐分离子指标在综合得分中的权重，系数越大，说明指标在综合得分的占比越大。在主成分一表达式中TS、SO_4^{2-} 系数占比较大其次是Cl^-、Na^++K^+、Mg^{2+}，主成分二表达式中pH、CO_3^{2-} 、HCO_3^- 对主成分影响较大，根据表达式可以进步一说明灌区内整体的盐渍化主要因子为SO_4^{2-} 、Cl^-、Na^++K^+、Mg^{2+}，影响pH的主要因子则为CO_3^{2-} 、HCO_3^- 。

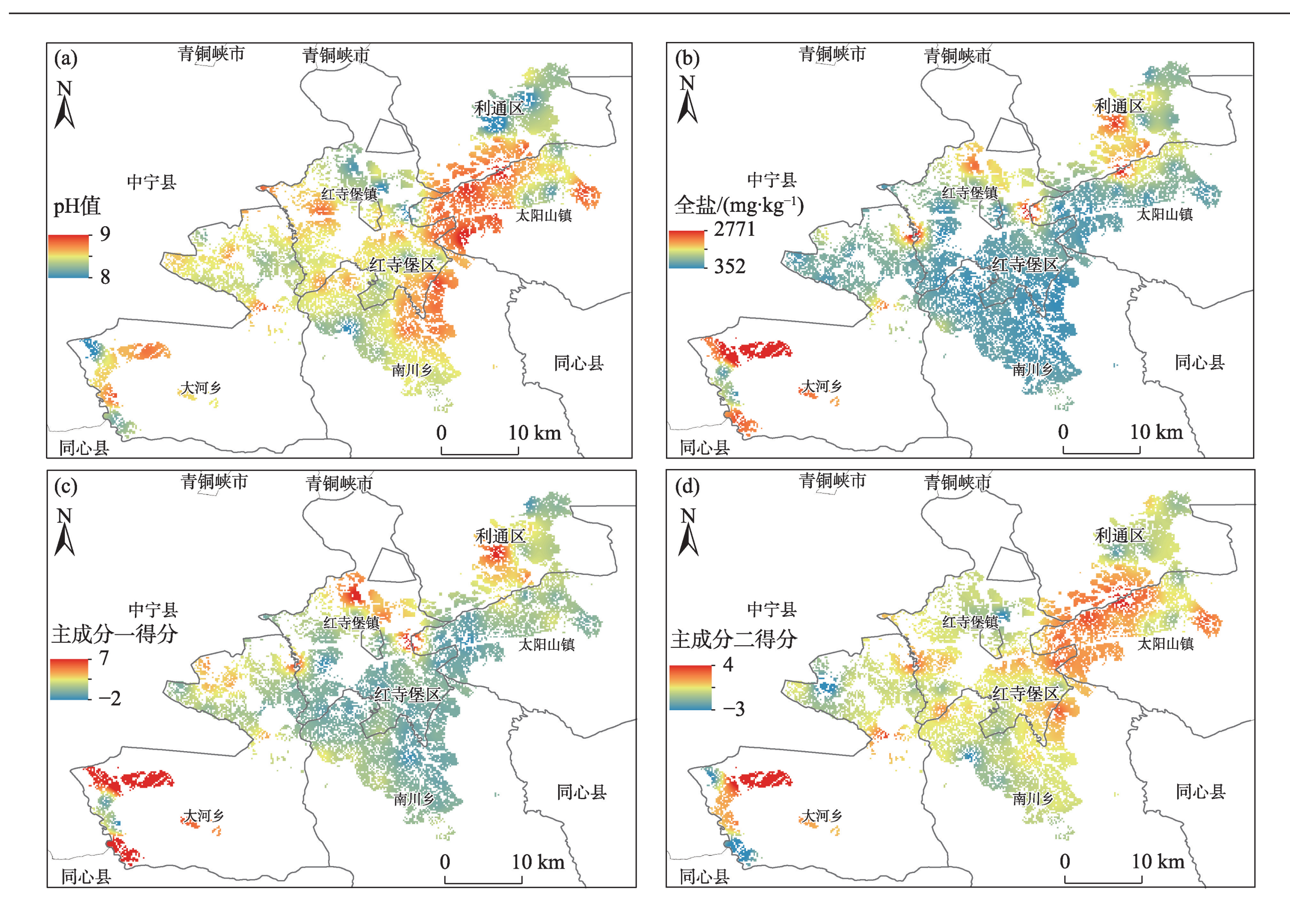
通过Z_1、Z_2表达式权重系数与数据标准化后的值相乘，得到各取样点的得分情况，并利用ArcGIS地统计分析中的反距离权重插值法，数据字段选择土壤pH值、全盐含量、主成分一得分、主成分二得分4个字段分别进行反距离权重插值，得到各指标在空间上的分布，从而对权重结果进行验证。主成分一和主成分二得分情况在空间上的分布与土壤pH和全盐的分布情况一致(图6)，验证了主成分一代表了土壤全盐含量、主成分二代表了土壤pH值，说明主成分分析结果能够对红寺堡扬黄灌区内的土壤盐渍化做出正确的评价。

4 讨 论

通过分析红寺堡扬黄灌区内不同土层土壤全盐含量、pH及各盐分离子特征及其相关性，有助于揭示红寺堡扬黄灌区土壤盐渍化程度及其离子构成，对灌区防治和改良土壤盐渍化有理论和指导意义。

在不同剖面深度土壤盐碱化特征方面，随着土壤深度的加深，pH、全盐和盐分离子含量在剖面上均呈增加趋势。首先，红寺堡气候干旱，属扬黄灌区，虽以漫灌方式为主，但亩均灌水量有限，无法形成有效的淋洗排盐过程[24]；其次，灌区红土母质的含盐量高，加之不透水层多集中在80~100 cm土层，盐分逐渐向深层集聚[25]；第三，研究区以玉米种植为主，相关研究表明，种植玉米有抑制土壤盐分的功能，随着种植季的更新，能够使土壤盐分和部分离子累积在土壤下层，从而使盐分形成底聚型[26]。

在土壤盐分构成方面，研究区 CO_3^{2-} 、HCO_3^- 与土壤pH呈现正相关，与胡志明等[27]研究发现的影响土壤pH值的决定性因素为HCO_3^-和Ca^{2+}结果相似，也与Dou等[28]在银川平原的研究中确定土壤CO_3^{2-} 、HCO_3^-浓度决定了pH的高值结果一致；研究区盐渍化类型主要取决于Cl^-和SO_4^{2-} 的浓度，与大量学者的研究结论吻合，彭丽等[29]通过研究发现不同深度土壤的盐渍化类型主要是由土壤中Cl^-和SO_4^{2-} 的浓度决定，王宁等[30]发现当土壤中硫酸盐越少时氯化物盐越多，Na^+与Cl^-的相关性会随着人类干扰程度的增强而增大，张龙飞等[31]研究发现随着土壤深度的加深，Cl^-与全盐的相关性减弱，SO_4^{2-} 与全盐仍具有极强的相关性；红寺堡扬黄灌区盐离子的运移以氯化盐为主，硫酸盐在土壤剖面上的运移速度较慢，这与祁通等[32]通过实验发现的土壤中Cl^-



注:图a、b、c、d分别为红寺堡pH值、全盐含量以及主成分一、主成分二得分情况的反距离权重插值

图6　土壤pH值、全盐以及主成分一、主成分二得分的反距离权重插值

Fig. 6　Inverse distance weight interpolation of soil pH, total salt, and principal component 1 and 2 scores

运移速率要大于SO_4^{2-}离子的结果一致。

红寺堡扬黄灌区开发至今已有20多年的历史,前后开展过3次土壤盐渍化调查,至2017年灌区盐渍化面积已达到5980 hm^2,盐渍化面积逐年增加。在干旱半干旱地区,不当的灌溉往往是诱导土地盐渍化的主要因素[33-34],“盐随水来,盐随水去”,水利改良措施是改良盐碱土的主要方法[35],在灌区内推行高效合理的灌排制度,控制灌排水量,防止盐分不断累积是红寺堡盐碱地防治的主要任务。土壤盐分在一定程度上还受环境因素的影响,包括气候、地貌、地形以及土地利用类型和人为因素等,导致土壤全盐含量变化规律不明显[36],本研究仅对春季农用地土壤盐渍化特征因子进行了研究,未考虑到季节动态特征及其驱动因素,将成为下一步重点开展的工作。

5　结 论

本研究通过对红寺堡扬黄灌区典型区域取样调查,得出如下结论:

(1) 研究区内土壤整体呈强碱性, pH值随着深度的加深而增大,在不同土层深度的变异性均呈弱变异性,并在深层趋于稳定;全盐含量相对较低,同样随着深度的加深而增大,具有明显的底聚型特征,但土壤全盐在0~20 cm土层属于中等变异性,在20~100 cm土层属于强变异性。

(2) 研究区阳离子主要为Na^++K^+,各阳离子浓度存在显著性差异($P<0.05$),主要阴离子为SO_4^{2-},其离子浓度显著高于其他阴离子($P<0.05$),各离子含量SO_4^{2-}>Na^++K^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>HCO_3^->Cl^->CO_3^{2-},各离子浓度随深度的增加而增加,与全盐和pH值变化一致,呈现出底聚型的特征。

(3) 基于相关性分析和主成分分析发现,影响研究区全盐的主要因子为SO_4^{2-}、Cl^-、Na^++K^+、Mg^{2+},影响pH的主要因子则为CO_3^{2-}、HCO_3^-,不同深度土层间盐类存在显著差异,上层主要为氯化盐类,下层则为硫酸盐与氯化盐复合型。

参考文献(References):

[1] Zhang Xiaoguang, Huang Biao, Liu Feng. Information extraction and dynamic evaluation of soil salinization with a remote sensing method in a typical county on the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. Pedosphere, 2020, 30(4): 496-507.

[2] 李星佑, 张飞, 王筝. 土壤盐渍化遥感监测模型构建方法现状与发展趋势[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 11-21. [Li Xingyou, Wang Fei, Wang Zheng. Present situation and development trend of remote sensing monitoring model for soil salinization[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 11-21.]

[3] 张锦新, 李慧, 郑恺雯, 等. 土壤盐碱化的空间变异性研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(8): 118-119. [Zhang Jinxin, Li Hui, Zheng Kaiwen, et al. Research progress on spatial variability of soil salinization[J]. Food Science and Technology and Economy, 2018, 43(8): 118-119.]

[4] Fu Zhanyong, Wang Ping, Sun Jingkuan, et al. Composition, seasonal variation, and salinization characteristics of soil salinity in the Chenier Island of the Yellow River delta[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: e1318.

[5] 王勇辉, 王艳丽, 海米提·依米提. 博尔塔拉河下游河岸带土壤盐分特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 139-142. [Wang Yonghui, Wang Yanli, Haimit Yimit. Analysis of soil salinity characteristics in Bohe River riparian zone[J]. Reserach of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 139-142.]

[6] 刘福全, 杜崇, 韩旭, 等. 基于3S技术的大庆地区土壤盐渍化时空变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 132-138. [Liu Fuquan, Du Chong, Han Xu, et al. Spatiotemporal variation in soil salinization in Daqing calculated using the 3S technology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 132-138.]

[7] 王晨晨, 孙向阳, 于雷, 等. 北京市通州区果园土壤盐碱化特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 223-229. [Wang Chenchen, Sun Xiangyang, Yu Lei, et al. Characteristic of soil salinization at orchards of Tongzhou District, Beijing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 223-229.]

[8] 石迎春, 辛民高, 郭娇, 等. 西北地区黑河中游盐渍化地区土壤盐分特征[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 28-37. [Shi Yingchun, Xin Mingao, Guo Jiao, et al. Salt characteristics of salt-affected soil in the middle reach of Heihe River in Gansu Province[J]. Geoscience, 2009, 23(1): 28-37.]

[9] 郑明, 白云岗, 张江辉, 等. 基于主成分分析法的干旱区典型绿洲土壤盐分特征分析——以新疆第二师31团为例[J]. 中国农学通报, 2020, 36(27): 81-87. [Zheng Ming, Bai Yungang, Zhang Jianghui, et al. Soil salinity characteristics of typical oasis in arid area based on principal component analysis: An example in Xinjiang[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(27): 81-87.]

[10] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 新疆伊犁察南灌区土壤盐分特征[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1001-1006. [Liu Qianqian, Su Litan, Liu Guangming, et al. Characteristics of soil salinity in Chanan irrigation area, Ili of Xinjiang[J]. Soils, 2017, 49(5): 1001-1006.]

[11] Zhao Haixia, Gu Binjie, Chen Dechao, et al. Physicochemical properties and salinization characteristics of soils in coastal land reclamation areas: A case study of China-Singapore Tianjin Eco-City[J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12629.

[12] 郭双双, 王勇辉. 艾比湖流域风沙土盐分特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 196-199, 219. [Guo Shuangshuang, Wang Yonghui. Salinity analysis of sandy soil in Ebinur Lake basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 196-199, 219.]

[13] 刘国应, 陈玉春. 宁夏红寺堡灌区土壤盐渍化成因与防治对策[J]. 价值工程, 2013, 32(3): 316-317. [Liu Guoying, Chen Yuchun. Analysis on the factors that affect soil salination of Ningxia Hongsipu irrigated area and how to prevent and cure[J]. Value Engineering, 2013, 32(3): 316-317.]

[14] 余秋生, 于艳青, 薛忠岐, 等. 宁夏扶贫扬黄灌溉工程红寺堡灌区盐渍化发展趋势预测[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 29(4): 38-41. [Yu Qiusheng, Yu Yanqing, Xue Zhongqi, et al. Prediction of the evoling trend of salification in the irrigation-developen area of Hongsipu, Ningxia[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 29(4): 38-41.]

[15] 方媛, 张汉婷, 刘睿. 基于WET的红寺堡灌区土壤盐渍化分布特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 1-6. [Fang Yuan, Zhang Hanting, Liu Rui. Study on distribution characteristics of soil salinization in Hongsibu irrigation area based on WET[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(3): 1-6.]

[16] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 内蒙古河套灌区紧邻排干沟土壤盐渍化与肥力特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 114-122. [Zhou Liying, Li Ruiping, Miao Qingfeng, et al. Characteristics of salinization and fertility of saline-alkali soil adjacent to drain age ditch in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 114-122.]

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008. [Bao Shidan. Agrochemical Analysis of Soil[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2008.]

[18] 郭军成, 王明国, 耿荣, 等. 宁夏银北灌区盐碱地盐渍化特征分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(5): 38-42. [Guo Juncheng, Wang Mingguo, Geng Rong, et al. Salinity characteristics analysis of saline alkali soil in Yinbei Irrigation District of Ningxia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(5): 38-42.]

[19] 王彤, 封超年, 靳瑞萍, 等. 苏北滨海盐碱土壤盐碱化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(19): 339-343. [Wang Tong, Feng Chaonian, Jin Ruiping, et al. Salinization characteristics of coastal saline-alkali soil in northern Jiangsu[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(19): 339-343.]

[20] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. [Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei. Chinese Saline Soil[M]. Beijing: Science Press, 1993.]

[21] Xu Li, Du Hongru, Zhang Xiaolei. Spatial distribution characteristics of soil salinity and moisture and its influence on agricultural

irrigation in the Ili River Valley, China[J]. Sustainability, 2019, 11 (24): 1-17.

[22] 李杰彪, 苏锐, 周志超, 等. 甘肃北山沙枣园地区土壤表层盐分特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 115-120. [Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. Analysis on characteristics of soil salinity in Shazaoyuan site of Gansu Beishan region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 115-120.]

[23] 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 等. 滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3562-3572. [Tang Jinlai, Zhao Kuan, Hu Ruixin, et al. Heavy metal concentration, source, and pollution assessment in topsoil of Chuzhou City[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3562-3572.]

[24] Sun Danfeng, Yu Xiaoqian, Liu Xiaona, et al. A new artificial oasis landscape dynamics in semi-arid Hongsipu region with decadal agricultural irrigation development in Ningxia, China[J]. Earth Science Informatics, 2016, 9(1): 21-33.

[25] 高维常, 蔡凯, 李寒, 等. 贵州典型植烟土壤pH值与速效钾的剖面分布模式[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 101-108. [Gao Weichang, Cai Kai, Li Han, et al. Profile distribution patterns of pH and available potassium in typical tobacco soils in Guizhou Province[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(2): 101-108.]

[26] 郭全恩, 王益权, 马忠明, 等. 植被类型对土壤剖面盐分离子迁移与累积的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2711-2720. [Guo Quan'en, Wang Yiquan, Ma Zhongming, et al. Effect of vegetation types on soil salt ions transfer and accumulation in soil profile[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13): 2711-2720.]

[27] 胡志明, 谢龙杰, 段必挺, 等. 保山植烟土壤pH与有机质组分及离子含量的关系研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1): 177-183. [Hu Zhiming, Xie Longjie, Duan Biting, et al. Study on the relationship between pH and organic matter components, ion content in Baoshan tobacco-planting soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, 37(1): 177-183.]

[28] Dou Bingyan, Jing Hefang, Wang Weihong, et al. Study on soil salinization characteristics of farmlands along West Trunk Canal in Ningxia based on Redundancy Analysis[J]. Hydraulic and Civil Engineering Technology, 2022, 12(23): 1167-1177.

[29] 彭丽, 王玲, 刘海隆, 等. 干旱区绿洲灌溉条件对土壤盐分分布的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 112-118, 124. [Peng Li, Wang Ling, Liu Hailong, et al. Effects of irrigation conditions on the soil salinization distribution in the oasis of arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 112- 118, 124.]

[30] 王宁, 熊黑钢, 叶红云, 等. 准格尔盆地不同程度人类干扰下土壤盐分及离子组成特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 56(6): 71-77, 189. [Wang Ning, Xiong Heigang, Ye Hongyun, et al. Soil salinity and ion characteristics under different degrees of human disturbance in Junggar Basin[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019, 56(6): 71-77, 189.]

[31] 张飞龙, 黄利英. 山南乃东区支那河流域土壤盐渍化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(24): 102-105, 117. [Zhang Feilong, Huang Liying. Analysis on the characteristics of soil salinization in Zhina River Basin of Shannan Naidong District[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(24): 102-105, 117.]

[32] 祁通, 黄建, 孙阳讯, 等. 滴灌条件下盐渍土盐分淡化区形成过程中离子运移特征[J]. 土壤与作物, 2021, 10(1): 47-59. [Qi Tong, Huang Jian, Sun Yangxun, et al. Characteristics of salt ion transport during the period of low salt area development in saline soil under drip irrigation[J]. Soils and Crops, 2021, 10(1): 47-59.]

[33] 刘学军, 刘平, 蒋正文. 宁夏扬黄灌区土壤盐渍化防治对策[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(9): 54-58. [Liu Xuejun, Liu Ping, Jiang Zhengwen. Control of soil salinization in irrigation area of Yellow River in Ningxia[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, 59(9): 54-58.]

[34] Ren Dongyang, Wei Boyu, Xu Xu, et al. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agro-ecosystems using integrated approaches[J]. Geoderma, 2019, 356: 11935.

[35] 杜学军, 闫彬伟, 许可, 等. 盐碱地水盐运移理论及模型研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 713-721. [Du Xuejun, Yan Binwei, Xu Ke, et al. Research progress on water-salt transport theories and models in saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 713-721.]

[36] 王巧焕, 卢玉东, 赛佳美, 等. 干旱区绿洲土壤盐分特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 503-509. [Wang Qiaohuan, Lu Yudong, Sai Jiamei, et al. Characteristics of soil salinity in arid oasis[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 503-509.]

Soil salinization characteristics in irrigation region of Yellow River of Hongsipu, Ningxia

NIU Zilu[1,2,3], WANG Lei[1,2,3], QI Tuoye[1,2,3], ZHANG Yijing[1,2,3], SHEN Jianxiang[1,2,3], YANG Zhuqing[1,2,3], WANG Entian[1,2,3], JIANG Shuting[1,2,3]

(1. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Breeding Base for Sate Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To explore the main factors influencing soil salinization in irrigation region of Yellow River of Hongsipu, correlation analysis and principal component analysis were used to study the salinization characteristics of the 0−100 cm soil profile. The results showed the following: (1) The overall soil in the study area is strongly alkaline, with the pH of the lower layer of 20−100 cm soil being significantly higher than that of the upper layer of 0−20 cm (P<0.05), which increases with increasing soil depth. The total salt content of soil also increases with increasing soil depth, showing a bottom aggregation-type profile feature of high at the bottom and low at the surface. The difference in total salt content of each layer of soil was not significant (P<0.05), which the pH of each layer of soil exhibited weak variability, with a relatively uniform spatial distribution. The total salt content of soil in the upper layer showed moderate variability at depths of 0−20 cm, while in the lower layer of depths of 20−100 cm it showed strong variabilily, with differences in spatial distribution appearing with changes in depth. (2) The main cation in the study area is Na^++K^+, with significant differences in the content of each cation (P<0.05). The main anion is SO_4^{2-}, which significant difference compared with other anions (P<0.05). The contents of the ions are in following order: SO_4^{2-} > Na^+ +K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > HCO_3^- > Cl^- > CO_3^{2-}, and the concentration of each ion also increases with increasing of soil depth, consistent with the changes in total salt and pH. (3) Through correlation analysis and principal component analysis, it was found that the main factors affecting total salt in the irrigation area are SO_4^{2-}, Cl^-, Na^++K^+, and Mg^{2+}, while the main factors affecting pH are CO_3^{2-} and HCO_3^-. The main salts are sulfate and chloride, but there are significant differences in salt types at different depth profiles. The upper layer of salt is mainly chloride, while the lower layer is a composite of sulfate and chloride. The results of this study prove the main factors affecting the soil salinity characteristics of irrigation region of Yellow River of Hongsipu, and provide a theoretical basis for the treatment of alkali soil in the study area.

Keywords: saline-alkali land; salinization characteristics; correlation analysis; principal component analysis; irrigation region of Yellow River of Hongsipu; Ningxia